

# 基于拉线位移传感器的机器人 标定应用研究\*

罗振军<sup>1</sup>, 孙思嘉<sup>2</sup>, 梅江平<sup>2</sup>, 陈落根<sup>1</sup>, 许健<sup>1</sup>

(1. 杭州娃哈哈集团机电研究院, 杭州 310016;

2. 天津大学机械工程学院, 天津 300110)

**[摘要]** 通过对拉线位移传感器在机器人标定领域国内外应用现状的研究, 简略介绍了单线式一维和三线式三维测量系统, 并提出一种单线复用三维测量系统模型。结合各测量系统的特点, 提出相应的参数辨识算法。为了选取合适的标定校准点, 以码垛机器人为例, 分析了机器人工作空间中不同位置扰动误差对拉线测量值的影响。对机器人名义  $D-H$  参数和拉线测量值等制造模拟误差进行仿真标定。仿真结果表明, 标定后定位精度提升 90%, 最后通过运动学标定试验进一步验证了标定方法的有效性, 并指出仍需解决的若干问题。

**关键词:** 拉线位移传感器; 测量系统; 码垛机器人; 机器人标定

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2017.09.043



罗振军

杭州娃哈哈集团智能装备研究所所长, 副教授, 2006 年博士毕业于英国伦敦大学国王学院。先后在伦敦大学、中科院沈阳自动化研究所、新松机器人公司、天津大学等单位从事机器人研发工作, 主要涉及激光焊接、激光切割、电弧焊等应用中各种工业机器人的数字化设计、控制系统开发、测量标定及系统集成等研究。发表 SCI/EI 论文 10 篇, 申请获得发明专利 20 余项。

拉线位移传感器是一种将旋转编码器和精巧的绞盘机构进行集成而实现的直线位移传感器, 具有结构紧凑、测量行程长、安装方便、价格低廉等特点, 在各种单轴位移测量应用中得到广泛使用。最早提出将拉线传感器用于空间位姿测量的大概是意大利卡西诺大学的 Ceccarelli 教授<sup>[1]</sup>, 他提出一种 3-2-1 构型的拉线式位姿测量机构, 并将其用于机器人工作空间评价等领域。随着拉线编码器性价比的提高, 将拉线位移传感器用于空间位姿测量的研究也越来越多, 例如冰川表面融化状况的实时监测<sup>[2]</sup>、人体行走时步态轨迹的测量<sup>[3]</sup>、高空舱内航空发动机尾喷口面积的实时测量<sup>[4]</sup>, 以及船舶分段对接时法兰间相对位姿的测量等。

机器人的应用领域不断扩大, 例如在航空领域, 离线编程技术得到了广泛的应用, 而工业现场对机器人定

位精度则提出更高的要求。近年来, 利用拉线传感器进行工业机器人运动学参数的精确标定成为热门研究, 这是因为基于拉线传感器的测量方案相对其他采用激光跟踪仪、三坐标测量仪, 或者便携式测量臂等仪器的方案来说价格相对较低, 而且能在环境恶劣的生产现场部署, 因而市场空间极大。但是这也对拉线传感器的结构设计、补偿算法等方面提出极高的要求。

目前最著名的拉线测量方案是美国 Dynalog 公司推出的 DynaCal 单线式机器人单元校准系统, 通过精密设计的机械结构和完善的补偿算法来精确识别机器人运动学参数, 操作简易。该公司的 CompuGauge 四线式系统则可实现机器人绝对定位精度和重复定位精度的三维动态测量。上海大学的洪银芳等<sup>[5]</sup>对后者进行了仿制, 试验证明一定条件下测量精度达到  $\pm 0.5\text{mm}$ 。哈尔滨工业大学

\*基金项目: 国家 863 计划项目(2011AA04A102)。

的肖永强等<sup>[6]</sup>则提出一种三线式测量机构,测量精度约 ±0.3mm。作者认为利用拉线传感器复用以及运动学耦合夹具<sup>[7]</sup>等方式,可以进一步提高上述方案的便携性,并且减少多条拉线之间差异等因素带来的误差项。

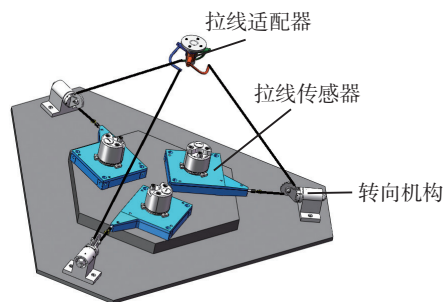
为此,本文对现有三线式和单线式拉线测量系统的优点进行综合,提出一种新型单线式三维测量系统,详细介绍相关的机器人参数辨识算法;然后以码垛机器人为例,通过给机器人  $D-H$  参数的名义值、拉线传感器测量值等加入虚拟误差,模拟仿真标定效果;最后基于单线式三维测量系统和激光追踪仪开展运动学标定试验,并对标定效果进行对比与分析。

### 拉线测量系统的数学模型

根据拉线传感器的数目可以将已有测量系统分为单线式、三线式和四线式等,其中,四线式与三线式测量原理相似,所以在此仅讨论单线式与三线式测量系统。

#### 1 三线式三维测量系统

图1所示为一种典型的三线式布局方式。3个拉线传感器间隔 120° 放置,拉线经过转向机构后与固定在机器人末端的拉线适配器相连,该适配器保证当机构稳定后作用线通过回转中心点。理想情况下,根据3个拉线传感器的输出位移  $l_i$  ( $i=1,2,3$ ) 即可推算出待测点坐标<sup>[8]</sup>。实际计算时,还需要考虑安装误差、



(a) 三线式测量系统布局方式

环境温度和受力造成的拉长变形等因素。

三线式测量系统结构简图如图1(b)所示,假设测量基准点为底面等边三角形3个顶点  $A_i$  (亦为转向轮与拉线下切点),系统坐标原点位于三角形中心点  $O$ ,转向轮与拉线切点为  $B_i$ ,转向轮圆心为  $R_i$ ,待测点坐标为  $P(X,Y,Z)$ ,设  $a$  为顶点  $A_i$  到原点  $O$  的距离,转向轮半径为  $r$ 。以第1组转向轮为例进行分析,拉线传感器输出位移可表示为

$$l_i = l_{PB_i} + r_i \quad (1)$$

其中,  $l_{PB_i}$  为待测点  $P$  到切点  $B_i$  的距离(下同),  $r_i$  为  $A_i$ 、 $B_i$  两点间的弧长量。由弧长公式和勾股定理可得:

$$r_i = r(2\pi - \alpha - \beta - \delta),$$

$$l_{PB_i} = \sqrt{l_{PR_i}^2 - r^2} \quad (2)$$

式中,

$$\alpha = a \tan\left(\frac{a}{r}\right), \quad \delta = a \cos\left(\frac{r}{l_{PR_i}}\right),$$

$$\beta = a \cos\left(\frac{l_{PR_i}^2 + a^2 + r^2 - \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}{2l_{PR_i} \sqrt{a^2 + r^2}}\right),$$

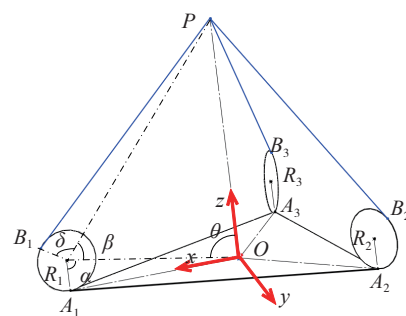
$$l_{PR_i} = \sqrt{l_{PO}^2 + l_{OR_i}^2 - 2l_{PO}l_{OR_i} \cos \theta},$$

$$\theta = a \cos\left(\frac{-X}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}\right) - a \tan\left(\frac{r}{a}\right),$$

$$l_{OR_i} = \sqrt{a^2 + r^2}, \quad l_{OP} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

$\angle A_i R_i O$ ,  $\angle O R_i P$ ,  $\angle B_i R_i P$  (即  $\alpha, \beta, \delta$ ) 可在各自所属三角形内由反三角函数求出。 $\angle R_i O P$  (即  $\theta$ ) 为  $\angle A_i O P$  与  $\angle A_i O R_i$  之差。

由于转向轮间隔 120° 对称放置,同理可得到其他两组拉线输出位



(b) 三线式测量系统结构简图

图1 三线式三维测量系统模型

Fig.1 3-line 3D measurement system model

移与待测点坐标的关系模型。最终可建立表示两者关系的三元非线性方程组

$$l_i = f(X, Y, Z) \quad (i=1,2,3) \quad (3)$$

若已知拉线输出位移  $l_i$ , 通过求解非线性方程组即可获得待测点坐标数值解。

#### 2 单线式一维测量系统

单线式测量模型如图2所示,相较于三线式测量系统,具有安装测量方便,成本低廉,模型计算简单等特点。利用单线式测量系统仅能获取测量基准点  $O$  与待测点  $P$  之间的长度量,无法计算待测点坐标,只能用于机器人运动学参数标定。需注意此模型会因转向滑轮缠绕带来测量误差,且误差随着待测点位置的变化而变化,是难以计算和补偿的。

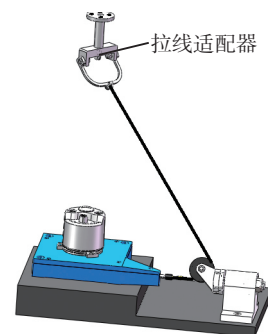


图2 单线式一维测量系统模型

Fig.2 Single-line 1D measurement system model

#### 3 单线复用三维测量系统

综合上述两种测量系统方案,利用单个拉线传感器和3个转向机构代替三线式测量模型,如图3所示。注意转向机构2、3的轴线延长线与转向机构1中的转向轮相切。使用时,首先经过转向机构1对待测点进行测量,之后分别经过转向机构1、2和转向机构1、3对待测点进行测量。根据获得的3组长度量可计算待测点坐标,计算时均选择拉线与转向滑轮的下切点作为测量基准点,则数学模型与三线式测量模型类似,在此将不做阐述。与三线式方案相比,此方案可有效降低成本,且由于适配器结

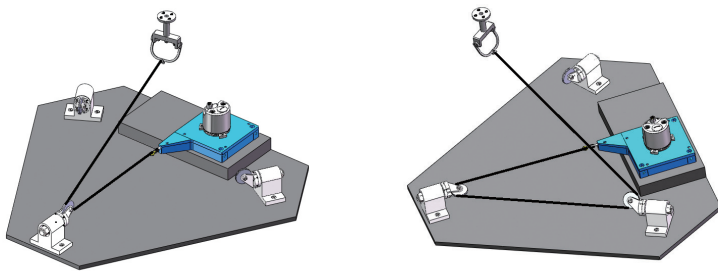


图3 单线复用三维测量系统  
Fig.3 Single-line 3D measurement system

构大大简化,所需要考虑的安装误差比三线式测量模型减少;另一方面,此方案增加了操作复杂性,即需要机器人执行至少3次运动程序。为了减少由于机器人重复定位带来的测量误差,通常采用增加测量次数的方式来弥补。

### 机器人标定方案

机器人运动学标定一般包括建模、测量、参数辨识和补偿4个部分。针对不同的测量系统有不同的参数辨识算法。

三线式三维测量系统和单线复用三维测量系统可采用基于距离误差模型<sup>[9]</sup>的参数辨识算法,由于校准点间的距离在不同坐标系中的值是不变的,所以无需计算机器人基坐标系与测量坐标系的变换关系,从而避免了此变换不准确造成的误差。标

定方案如图4所示。本文以娃哈哈公司SE4300码垛机器人为例,首先构建码垛机器人D-H模型,并建立机器人末端距离误差 $\Delta L = L_m - L$ 与D-H误差参数向量 $e$ 间的关系方程:

$$e = \arg \min_{e \in \Omega} \left[ \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} (L_m^i - L^i)^2 \right] \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} L_m^i &= \|P_m^{i+1} - P_m^i\| \\ L^i &= \|P^{i+1} - P^i\| \quad (i=1,2,\dots,N-1) \end{aligned} \quad (5)$$

$P_m$ 为机器人校准点的实测坐标值, $P$ 为误差D-H模型在驱动关节角度 $Q$ 下的计算坐标值,驱动关节角度 $Q$ 为校准点由名义D-H模型运动学逆解求得, $\Omega$ 为误差向量 $e$ 参数变动范围, $N$ 为校准点数目。通过运用信赖域或列文伯格-马夸尔特算法对非线性方程(1)进行求解,即可得到几

何误差源 $e$ 的最优值。

单线式一维测量系统则采用基于测量距离误差<sup>[10]</sup>的参数辨识算法,建立测量距离误差 $\Delta d = d_m - d$ 与D-H参数误差 $e$ 间的关系方程:

$$(e, P_o) = \arg \min_{e \in \Omega} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_m^i - d^i)^2 \right] \quad (6)$$

其中,

$$d^i = \|P^i - P_o\| \quad (i=1,2,\dots,N-1) \quad (7)$$

$d_m$ 为拉线测量距离, $P_o$ 表示测量基准点在机器人基坐标系的位置坐标,其余量的解释同三维测量系统标定方案相同。通过求解非线性方程(3)可以同时辨识出几何误差源 $e$ 和测量原点坐标 $P_o$ 的最优值。

### 灵敏度分析与仿真标定

#### 1 灵敏度分析

校准点的选取是机器人运动学标定的基础。为了在工作空间内选取合适的校准点位置,减少由机器人重复定位造成的测量误差,可以分析工作空间内不同位置扰动误差对拉线测量值的影响。码垛机器人工作空间如图5所示,为了计算方

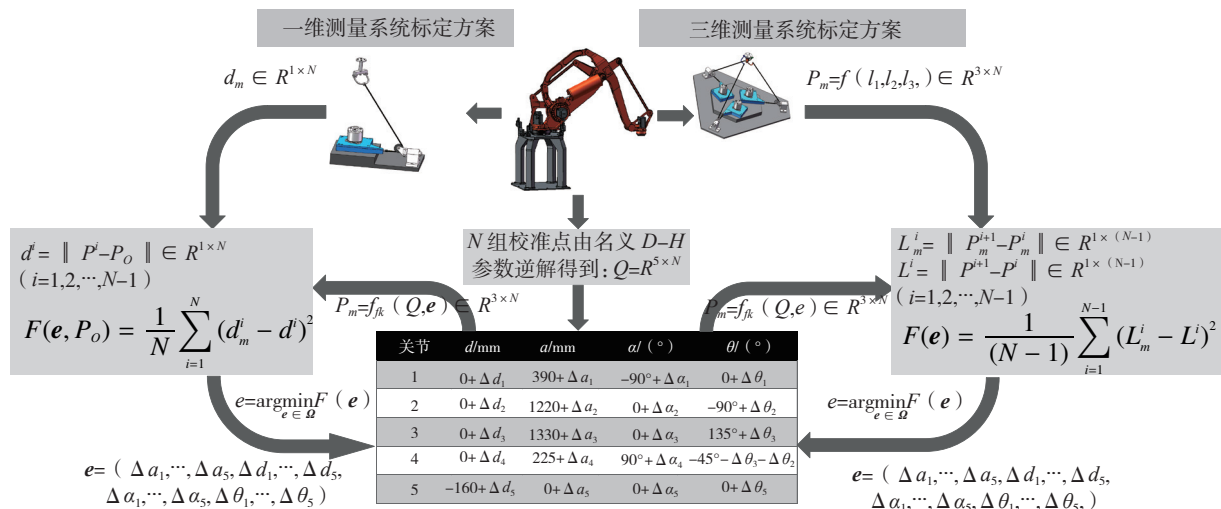


图4 机器人标定方案  
Fig.4 Project of robot calibration

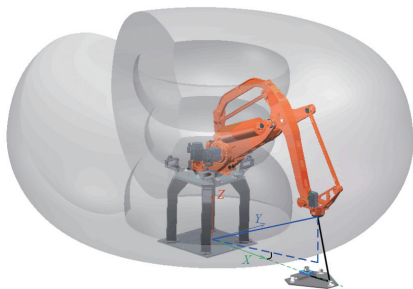


图5 码垛机器人工作空间

Fig.5 Workspace of robot palletizer

便,在机器人基坐标系下选取点  $O$  (2000,0,0) 作为测量原点,并使得转向机构回转轴线与  $x$  轴重合,假设转向轮半径  $r=15\text{mm}$ ,待测位置点坐标可表示如下:

$$\begin{cases} x = l \cos \beta \\ y = l \sin \beta \\ z = z \end{cases} \quad (8)$$

$l$  为目标点与基坐标系原点的连线在  $xy$  平面的投影长度,  $\beta$  为目标点与基坐标系原点连线和转向机构回转轴线的夹角在  $xy$  平面的投影角度。沿腰关节转动方向每隔  $40^\circ$  取一工作空间截面(腰关节转动范围  $-160^\circ \sim 160^\circ$ ),并在各截面内均匀选取有限位形,共计 10701 个。对每个目标点位置制造扰动,即在位置点附近一个半径为  $10\text{mm}$  的球内利用蒙特卡洛法取 10 个近似点,按照图 6 所示的操作流程得到拉线测量

误差对工作空间不同位置扰动误差的综合灵敏度系数。灵敏系数随回转半径  $l$ 、腰关节转角  $\beta$ 、目标点  $z$  值的变化如图 7 所示,当  $\beta=0$ ,即目标点位置向量与转向机构回转轴线共面时,测量误差灵敏度系数最小,而随着  $l$  和  $z$  值的增大,转向滑轮包角逐渐减小,使得测量误差灵敏度系数逐渐变小。但因为校准点的选取要遵循尽可能多地覆盖机器人位姿的原则,所以  $l$  和  $z$  值的范围不可过小,而  $\beta$  值的变化可理解为将所有校准点做相同的平移变换,对点与点间位移量没有影响,所以可以选择在  $\beta$  值较小的工作空间截面内选取校准点。

## 2 码垛机器人仿真标定

研究表明,机器人连杆的几何参数变化是产生位置误差的主要原因,约 95% 的机器人定位精度误差是由  $D-H$  运动学模型的不准确描述造成的<sup>[1]</sup>。所以可以对码垛机器人名义  $D-H$  模型制造模拟误差以代替真实  $D-H$  模型,依然假设测量系统测量原点位于  $O=(2000,0,0)$ ,转向轮半径  $r=15\text{mm}$ ,根据测量误差灵敏度分析的结果,在机器人工作空间内选取 50 组校准点。考虑到单线式一维测量系统转向滑轮带来的误差,仿真时需要对接线测量值加入虚拟弧长量,由于测量系统与机器人相对位置关

系已知,弧长量可准确计算出。而单线复用三维测量系统可以通过在校准点附近半径为  $1\text{mm}$  的球内随机取点来模拟机器人重复定位造成的误差,假设测量时对同一点进行 5 次测量并取长度平均值,则需要在校准点附近球内随机取 5 个点。

依据上述机器人标定方案校准模拟误差  $D-H$  模型,标定前后机器人绝对定位精度和距离精度对比如图 8 所示。表 1 给出标定前后位置误差和距离误差的最大值、平均值和标准方差。表 2 则给出 4 组  $D-H$  参数,分别是模拟误差模型  $D-H$  参数,经过单线一维、单线复用三维和三线三维测量系统标定修正后的  $D-H$  参

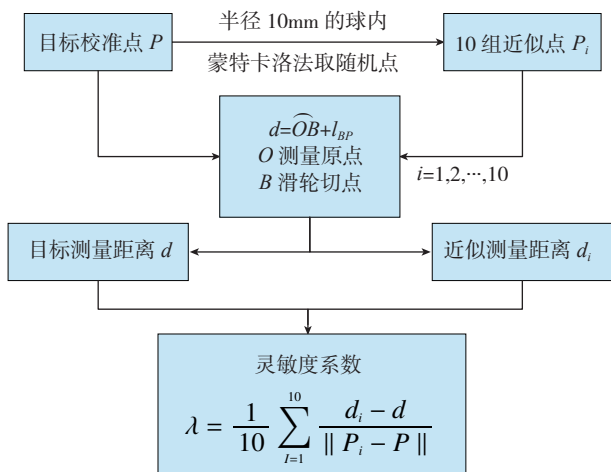
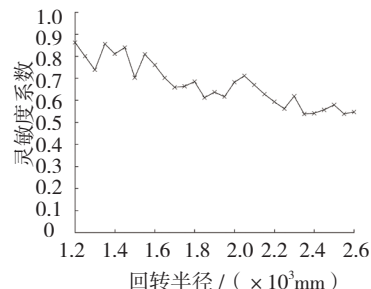
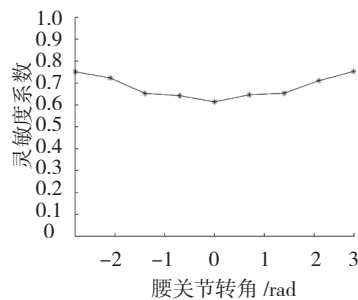


图6 测量误差灵敏度分析流程图

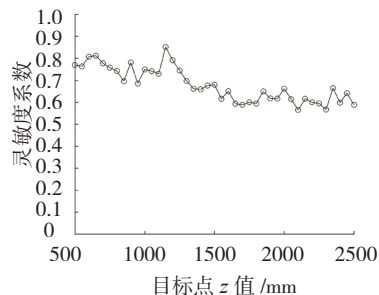
Fig.6 Analysis of measurement error sensitivity



(a) 测量误差对回转半径灵敏度



(b) 测量误差对腰关节转角灵敏度



(c) 测量误差对目标点 z 值灵敏度

图7 测量误差灵敏度系数变化

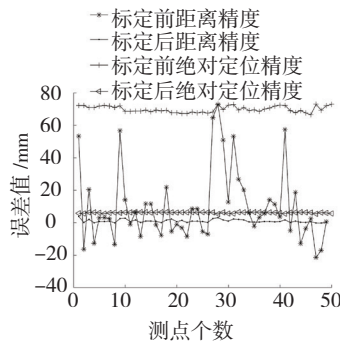
Fig.7 Change of measurement error sensitivity

数。

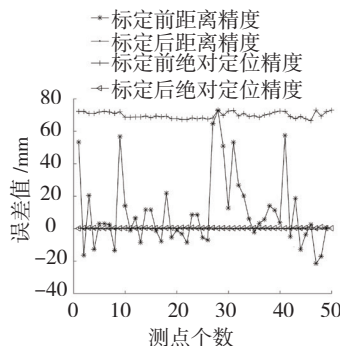
由表 1 数据可以看出,经过三线式三维测量系统仿真标定后,定位精度显著提高。单线复用三维测量系统标定结果次之,但也达到了理想的标定效果。而单线一维测量系统标定后绝对定位精度均值仅达到 6.16mm,相较于标定前提升了 91%,此结果应与滑轮假设半径有关,通过减小半径值,增多校准点数目或多次迭代等措施可提升标定效果。同时观察表 2,采用不同标定方法得到的  $D-H$  参数存在一定的差异性,可以推论标定结果存在多解。

### 运动学标定试验

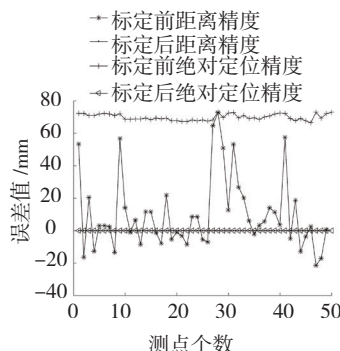
为了进一步验证标定方法的有效性,对比仿真结果。现基于单线复用三维测量系统开展运动学标定试验,为了研究测量精度对标定效果的影响,试验过程中同时采用激光追踪仪检测机器人末端位置。试验条件如下:工业机器人选用娃哈哈 SE4300 四自由度码垛机器人;拉线位移传感器选用 SICK 公司型号为 BCG13-E1BM0599 的经济型拉线编码器,测量线性度 0.5mm,量程 5m;激光追踪仪选用 Leica 公司的 AT901,测量精度 15  $\mu$ m。试验步骤如下:(1)重复示教机器人到达仿真时选择的 50 组校准点 3 次;(2)分别记录由拉线测量机构获得的第一组拉线长度值和激光追踪仪获得的位置坐标;(3)改变拉线测量机构的拉线缠绕方式并重复步骤(1)和(2),获得第二、三组拉线长度值;(4)对测量数据进行处理,由 3 组长度值



(a) 单线一维测量标定前后精度对比



(b) 单线三维测量标定前后精度对比



(c) 三线三维测量标定前后精度对比

图8 仿真标定前后精度对比

Fig.8 Comparison of accuracy before and after calibration

求解拉线测量机构获取的机器人实际坐标。采用基于距离误差模型的参数辨识算法识别机器人几何误差源,并修正名义  $D-H$  参数,修正后两

表1 仿真标定前后误差对比

距离误差	最大值/mm		平均值/mm		标准方差		
	距离误差	位置误差	距离误差	位置误差	距离误差	位置误差	
标定前	72.80	73.13	16.33	69.88	18.66	1.89	
标定后	单线一维	3.81	6.48	0.98	6.16	0.90	0.33
	单线三维	1.33	0.94	0.37	0.68	0.32	0.21
	三线三维	0.02	0.02	0.005	0.01	0.004	0.003

表2 模拟误差  $D-H$  参数和标定后修正  $D-H$  参数

$D-H$ 参数	模拟误差模型	单线一维测量标定	单线三维测量标定	三线三维测量标定
$a_1/mm$	392	393.3	388.6	388.5
$a_2/mm$	1218	1218.5	1218	1218
$a_3/mm$	1303	1303.2	1303	1303
$a_4/mm$	220	221.7	223.8	223.5
$a_5/mm$	0	-1.3	-0.5	0
$d_1/mm$	0	0.8	0.6	1
$d_2/mm$	0	0	-0.9	0.1
$d_3/mm$	0	0	-0.9	0.1
$d_4/mm$	0	0	-0.8	0.1
$d_5/mm$	-158	-155.1	-158.7	-159
$\alpha_1/^\circ$	-90	-90	-90	-90
$\alpha_2/^\circ$	0	0	0	0
$\alpha_3/^\circ$	0	0	0	0
$\alpha_4/^\circ$	90	89.9	91.2	89.9
$\alpha_5/^\circ$	0	0.1	0	0
$\theta_1/^\circ$	0	0	0	0
$\theta_2/^\circ$	-90	-90	-90	-90
$\theta_3/^\circ$	138	137.3	138.1	138
$\theta_4/^\circ$	-48	-47.3	-48	-48
$\theta_5/^\circ$	0	0.2	0	0.1

表3 修正  $D-H$  参数

$D-H$ 参数	名义 $D-H$ 参数	激光追踪仪标定	单线三维测量系统标定
$a_1/mm$	390	391.41	393.3
$a_2/mm$	1220	1222.6	1218.5
$a_3/mm$	1300	1296.74	1303.2
$a_4/mm$	225	227.28	225.7
$a_5/mm$	0	-2.3	-1.7
$d_1/mm$	0	0	0.8
$d_2/mm$	0	0.1	0
$d_3/mm$	0	0	0
$d_4/mm$	0	0	0
$d_5/mm$	-160	-161.22	-158.1
$\alpha_1/^\circ$	-90	-90	-90
$\alpha_2/^\circ$	0	0	0
$\alpha_3/^\circ$	0	0.08	0
$\alpha_4/^\circ$	90	89.82	89.9
$\alpha_5/^\circ$	0	0	0.1
$\theta_1/^\circ$	0	0.01	0
$\theta_2/^\circ$	-90	-90	-90
$\theta_3/^\circ$	138	142	137.3
$\theta_4/^\circ$	-48	-52	-47.3
$\theta_5/^\circ$	0	0.04	0

组  $D-H$  参数见表 3。

为了验证参数识别结果的准确性,根据 GB/T 12642-2013《工业机器人性能规范及其试验方法》的要求,检测机器人在标定前后的位置准确度。在机器人工作空间内选取 5 个验证位姿,分别用名义  $D-H$  参数和两组修正后的  $D-H$  参数对指定位姿求逆解。用求得的 3 组逆解分别控制机器人重复 30 次走到指定位姿,用激光追踪仪检测末端坐标。最后基于轴线测量法<sup>[12]</sup>获取测量坐标系与机器人基坐标系的转换关系。通过计算得到机器人标定前后位置误差的最大值、均值和标准差,如表 4 所示。

由表 4 数据可知,基于激光追踪仪和单线复用三维测量系统标定后,机器人末端位置准确度分别提升近 63% 和 35%。表明标定后的  $D-H$  模型更加接近真值,本文所述的标定方法是有效的。但由于装配制造、变形、选用较低精度的拉线编码器和拉线的重复固定等因素的影响,使得单线复用三维测量系统测量精度不及激光追踪仪,进而影响到标定效果。后期通过选用高精度拉线编码器和对测量机构的结构参数、变形误差等进行研究,可以进一步提升标定效果。需要注意的是,基于激光追踪仪标定后距离误差均值仍有 2.3mm,造成此现象的原因可能是现场环境嘈杂引起机器人振动较大,对测量结果造成一定影响,以及机器人受重力、温度等因素的影响会产生变形误差。

## 结论

(1) 简略介绍了三线式三维和单线式一维测量系统模型,并综合两者的优点提出一种低成本的单线复用三维测量系统。

(2) 通过分析拉线测量距离对机器人不同空间位置扰动误差的灵敏度系数,为校准点的选取提供依据,当校准点位置向量与转向机构回

表4 标定前后位置误差对比

	最大值 /mm	平均值 /mm	标准方差
标定前	12.52	5.69	4.67
激光追踪仪标定后	4.67	2.30	1.79
单线三维标定后	8.26	4.14	3.10

转轴线向量共面时,测量误差灵敏度系统最小。

(3) 仿真表明基于单线复用三维测量系统标定后精度提升 90% 以上,而试验表明标定后精度提升 35% 以上。一方面验证了标定方法的有效性;另一方面说明了测量值的准确性对标定结果有很大影响。如何在标定方案可行的条件下,补偿测量系统由机械加工装配、测量环境影响等因素引起的系统误差是后续的研究重点。此外,仿真未考虑机器人重力变形,关节传动等非线性误差,也需要后期继续改进。

## 参考文献

[1] CECCARELLI M, AVILA C C, OTTAVIANO E. Error analysis and experimental tests of CATRASYS (Cassino Tracking System) [C]// Industrial Electronics Society. Proceeding of Conference of the IEEE, 2000: 2371-2376.

[2] HULTH J. Using a draw-wire sensor to continuously monitor glacier melt[J]. Journal of Glaciology, 2010, 56(199): 922-924.

[3] 张立勋,王令军,王凤良,等.一种人体步态轨迹测量方法[J].测控技术,2009,28(2):24-27.

ZHANG Lixun, WANG Lingjun, WANG Fengliang, et al. A kind of measurement method for human gait[J]. Measurement and Control Technology, 2009, 28(2): 24-27.

[4] 苏金友,袁世辉,赵涌,等.激光测距技术在高空舱内测量喷口面积试验分析[C]//2013年航空试验测试技术峰会暨学术交流会议论文集,2013.

SU Jinyou, YUAN Shihui, ZHAO Yong, et al. Experimental analysis of measuring the nozzle area using laser distance technology in altitude chamber [C]// Proceeding of Aviation Test and Test Technology Summit and Academic Exchange in 2013, 2013.

[5] 洪银芳,鲍晟,高慧慧.拉线式机器人末端定位精度测量系统[J].工业控制计算

机,2016,29(4):40-41.

HONG Yinfang, BAO Sheng, GAO Huihui. Positioning accuracy and trajectory cable-measurement system[J]. Industry Control Computer, 2016, 29(4): 40-41.

[6] 肖永强,游玮,孔民秀,等.基于拉线传感器的工业机器人标定系统研制[J].机器人技术与应用,2015(6):26-30.

XIAO Yongqiang, YOU Wei, KONG Minxiu, et al. Robot calibration system based on draw wire sensor[J]. Robot Technique and Application, 2015(6):26-30.

[7] SLOCUM A H. Design of three-groove kinematic couplings[J]. Precision Engineering, 1992, 14(2): 67-76.

[8] 成世良.基于拉线传感器的工业机器人标定系统设计[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

CHENG Shiliang. Robot calibration system based on draw wire sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[9] 侯琳祺,冯淑红.基于距离精度的机器人 5 参数位置误差模型[J].机器人技术与应用,2002(2):31-35.

HOU Linqi, FENG Shuhong. Five parameters position error model of robot based on range accuracy [J]. Robot Technique and Application, 2002(2): 31-35.

[10] MESSAY T, ORDÓÑEZ R, MARCIL E. Computationally efficient and robust kinematic calibration methodologies and their application to industrial robots[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 37: 33-48.

[11] JUDD R P, KNASINSKI A B. A technique to calibrate industrial robots with experimental verification[J]. IEEE Transaction on Robotics & Automation, 1991, 6(1): 20-30.

[12] WU Y, LI C, LI J, et al. Comparative study of robot kinematic calibration algorithms using a unified geometric framework[C]// Proceeding of ICRA, 2014:1393-1398.

通讯作者:罗振军, E-mail: zhenjunluo@foxmail.com.

## Application Research of Robot Calibration Based on Draw-Wire Displacement Sensors

LUO Zhenjun<sup>1</sup>, SUN Sijia<sup>2</sup>, MEI Jiangping<sup>2</sup>, CHEN Luogen<sup>1</sup>, XU Jian<sup>1</sup>

(1. WAHAHA Mechanical and Electrical Engineering Institute, Hangzhou 310016, China;

2. College of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300110, China)

**[ABSTRACT]** The single-line 1D and 3-line 3D measurement systems are introduced briefly, and a single-line 3D measurement system is proposed by studying the current situation and application of the draw-wire displacement sensor in the field of robot calibration. The parameter identification algorithms corresponding to each of the measurement systems are proposed as well. In order to select appropriate calibration points, an example of a robot palletizer is given to analyze the effect of the error of robot work position on the value of cable measurement. A simulation is carried out to calibrate manufacturing error on nominal  $D-H$  parameters and measurement parameters, whose results show that the accuracy after the calibration is improved by 90%. Finally, the validity of the calibration methods is further verified by the kinematic calibration experiment, and some problems still needed to be solved are pointed out.

**Keywords:** Draw-wire displacement sensor; Measurement system; Robot palletizer; Robot calibration

(责编 玲犀)

(上接第42页)

Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(11): 42-45.

[11] BRANKO S. Wing structural assembly methodology[J]. SAE Paper 1998-10-13975, 1998.

[11] 马世平. 现场总线标准的现状和工业以太网技术[J]. 机电一体化, 2007(3): 6-13.

MA Shiping. Current status of fieldbus standards and industrial Ethernet technology [J]. Mechatronics, 2007(3): 6-13.

[12] 田威,戴家隆,周卫雪,等. 附加外部轴的工业机器人自动钻铆系统分站式任务规划与控制技术[J]. 中国机械工程, 2014, 25(1): 23-27.

TIAN Wei, DAI Jialong, ZHOU Weixue,

et al. Process planning and control technology on multi-station working mode of robot drilling and riveting system with auxiliary Axi [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(1): 23-27.

**通讯作者:** 田威, 教授, 研究方向为自动化装配技术、钻铆工艺和机器人, E-mail: tw\_nj@nuaa.edu.cn.

## Integrated Control System of Robot Automatic Drilling and Riveting Technology

ZHANG Jin, TIAN Wei, ZHOU Min, TIAN Linshan

(School of Mechanical and Electrical Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**[ABSTRACT]** For the control of aircraft automatic assembly of robot automatic drilling and riveting system, an automatic drilling and riveting equipment used an industrial robot as the carrier and based on Beckhoff control system is designed. The control system brings the industrial robot, extended floor rail, multifunctional end effector, tool magazine and other ancillary equipment together through the core of Beckhoff control software based on fieldbus mode, which can realize the real-time control of the machining site. And through a series of precision compensation measures in many aspects of the error to improve the accuracy of compensation, experiments show that the system can produce any hole with a positioning precision within  $\pm 0.5\text{mm}$ , a perpendicular accuracy within  $0.3^\circ$ , a diameter tolerance of H8, a countersink depth tolerance of  $\pm 0.01\text{mm}$ .

**Keywords:** Automatic drilling and riveting; Integrated control; Robot; End effector; Floor rail

(责编 铃兰)